第46卷 第1期
2023年1月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46 No. 1
Jan. 2023

输水漫溢对塔里木河中游胡杨林恢复的影响

王 振[1,2]， 李均力[1,3]， 张久丹[1,2]， 吴浩儒[1,2]， 郭雪飞[4]

（1. 中国科学院新疆生态与地理研究所，荒漠与绿洲生态国家重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011；
2. 中国科学院大学，北京 100049；3. 新疆遥感与地理信息系统应用重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011；
4. 塔里木大学生命科学学院，新疆 阿拉尔 843300）

摘 要： 生态输水是胡杨林保护专项行动的重要举措，分析输水漫溢对胡杨林恢复的影响是评估生态修复成效的关键。以塔里木胡杨国家级自然保护区为研究对象，采用密集时序遥感技术对2016年胡杨林保护专项行动实施以来的生态输水进行动态监测，定量分析漫溢水面和漫溢频次对胡杨林植被盖度变化的影响。结果表明：（1）漫溢水面主要存在于8—9月，年漫溢面积最大为246.7 km^2，最小为70.5 km^2，在空间分布上呈现北多南少、下游大于上游的格局。（2）2016—2021年保护区胡杨林植被盖度从18.88%增加至19.61%，其中输水漫溢面占比65%的塔里木河北岸呈增加趋势，而南岸呈减小趋势。（3）输水漫溢区植被盖度的平均增长速率最高可达未输水区的4~5倍，当输水漫溢频次为3次时，植被盖度的增长速率显著提高。

关 键 词： 塔里木胡杨国家级自然保护区；生态输水；植被覆盖度；生态评估

文章编号： 1000－6060(2023)01－0094－09(0094～0102)

胡杨是唯一能在极端干旱沙漠环境中生存的稀有阔叶落叶乔木树种，在防风固沙、调节区域气候、维持区域生态平衡等方面具有重要作用[1-2]。广泛分布于塔里木河干流中下游的胡杨林总面积逾100×10^4 hm^2，特别是以塔里木胡杨国家级自然保护区为主的原始胡杨林是塔里木河防风固沙林的重要组成部分，成为绿洲重要的生态屏障[3-4]。2001年起，为拯救塔里木河下游胡杨林生态系统，在塔里木河上游和中游进行了输水堤防、生态闸等水利设施的建设，输水堤防束缚了汛期洪水漫溢，保证河道的输水能力，提高了向下游输水效率，为下游生态修复起到了积极作用[5-7]。然而，堤防的建设也阻断了中游洪水的自由漫溢，目前恢复良好的胡杨林主要分布在河道两岸的狭长区域里，而远离河道未受生态输水的林区生态退化明显[8-9]。2016年以来，自治区政府启动塔里木河流域胡杨林生态保护专项行动，塔里木胡杨国家级自然保护区是生态输水的重点区域[9]。开展保护区生态输水漫溢的动态监测和胡杨林恢复的定量评估，对评价胡杨林保护专项行动成效，制定更合理的输水策略有重要意义。

目前，生态输水漫溢干扰对植被群落的恢复研究是胡杨林生态恢复评估的热点之一[10-12]。相关研究表明，漫溢后植被的物种多样性和丰富度相比于比非漫溢区明显增加[13]，群落构成由乔(灌)木占优势转变为多年或一年生草本占优势[14]。在漫溢频次上，过高或者过低都不利于植被物种多样性的恢复，而中等频次的漫溢能够维持较高的物种多样性[15]。在胡杨生理指标方面，生态输水漫溢后胡杨的郁闭度、盖度、冠幅等生态指标呈现增长的趋势[16]，胡杨叶片的相对含水量[17]和年轮宽指数[18]也均呈现增加的趋势[17-18]。在荒漠生态系统尺度上的遥感监测结果表明，生态输水实施以后塔里木河下游植被长势明显好转[19]，植被面积持续增加，净初级生产力上升趋势明显[20]。2016年胡杨林保护专项行动以

收稿日期： 2022-05-11； **修订日期：** 2022-07-17
基金项目： 中国科学院创新交叉团队项目(JCTD-2019-20)；国家自然科学基金(2003201)；第三次新疆综合科学考察(2021XJKK1400)；新疆天山创新团队(2020D14016)资助
作者简介： 王振(1995-)，男，硕士研究生，主要从事干旱区水资源与湖泊变化机理研究. E-mail: wangzhen19@mails.ucas.ac.cn
通讯作者： 李均力(1980-)，男，博士，研究员，主要从事遥感信息提取、水资源遥感等方面的研究. E-mail: lijl@ms.xjb.ac.cn

来，塔里木河中游胡杨林重点保护区的荒漠林样方监测结果表明，距离闸口100~300 m内胡杨幼苗增幅达到90%，长势优良的胡杨出现频率随着被漫溢年限的增加呈现递增趋势[21]。淹灌2 a后胡杨林物种多样性增加，长势结构趋于优化，而距离淹灌较远区域的胡杨林基本没有得到改善[22]。上述研究主要采用样方调查方法评估生态输水漫溢效益，而遥感技术是大范围、全域监测的主要手段[23-24]。

因此，本文以塔里木胡杨国家级自然保护区为研究区，采用多源遥感数据提取生态输水漫溢水面和胡杨林植被覆盖度指标，研究2016年胡杨林保护行动实施以来生态输水漫溢面积和漫溢频次对胡杨林植被覆盖度的影响，定量评估生态输水成效，以促使输水工作更好地服务于胡杨林生态保护。

1　研究区概况

塔里木胡杨国家级自然保护区位于塔里木河干流中游英巴扎—喀尔曲尕段，轮台县、尉犁县和库尔勒市境内。塔里木河自西向东横贯保护区全境，在保护区内长度为162.2 km（图1）。塔里木胡杨国家级自然保护区东西长109.7 km，南北宽约47.1 km，总面积3954 km²，气候类型为温带大陆性荒漠气候，平均气温9.7~10.8 ℃，平均降水量45.2 mm，潜在蒸发量高达1887~2910 mm，海拔高度为800~940 m[25]。植物主要以乔木胡杨群落和灌木柽柳群落为主，除此之外还有草甸植被、沼泽植被、水生植被。为了科学管理、有效保护、合理开发利用，生态恢复和可持续发展的目的，将保护区划分为核心区、缓冲区和实验区，其中核心区面积1804 km²，占总面积的45.62%；实验区面积330 km²，占总面积的8.35%；缓冲区面积1820 km²，占总面积的46.03%。

2　数据与方法

2.1　研究数据

本文使用的遥感数据主要包括2016—2021年Sentinel-2A/B、Landsat-8、HJ-1A/B，共计113景。其中，Sentinel-2A/B、Landsat-8来源于USGS（https://earthexplorer.usgs.gov/），HJ-1A/B来源于中国资源卫星应用中心（http://www.cresda.com/CN/）。由于HJ-1A/B没有经过几何精校正，与Landsat-8影像比对发现，图像上地物的位置与其对应的地面地物的位置差异较大，因此需要进行几何位置配准校正，最后将3种数据处理为地表反射率产品。

2.2　研究方法

2.2.1　生态输水漫溢水面监测　塔里木胡杨国家级自然保护区地处荒漠地带，没有建筑物、山体阴影等杂质影响，且使用Sentinel-2A/B计算归一化水体指数（NDWI）[26]所用波段均为10 m。因此，本文采用一种半自动化的NDWI阈值分割方法提取漫溢水面。首先使用ENVI+IDL平台构建NDWI，结合实地调查和高分影像确定分割阈值，将分割后漫溢面积

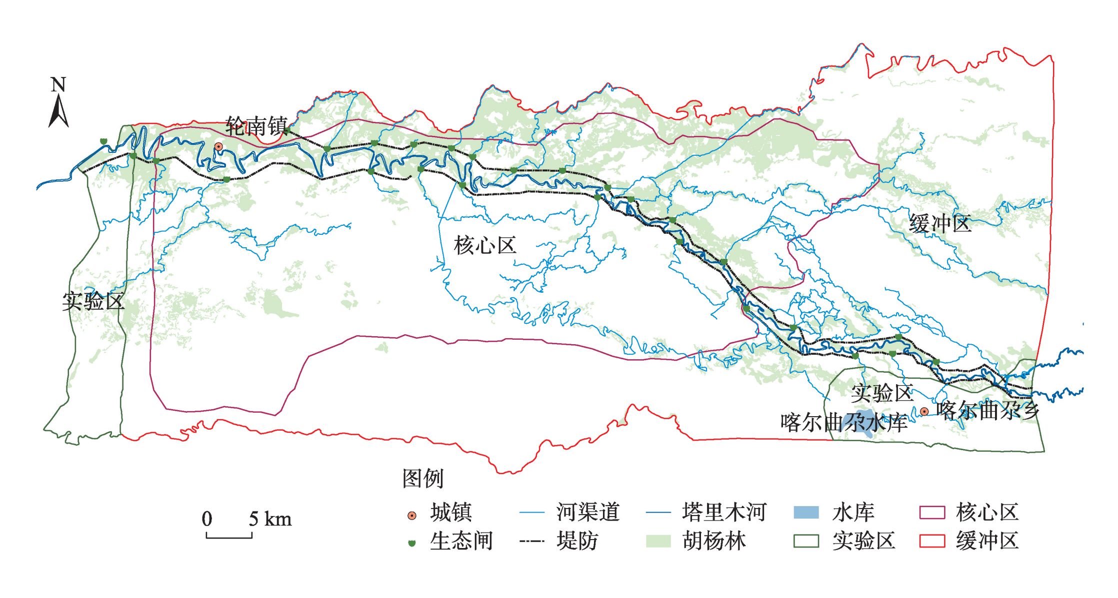


图1　研究区概况

Fig. 1　Overview of the study area

栅格文件转为shapefile格式矢量文件，经过批量自动化处理后，导入ArcGIS软件对错分、漏分的区域进行人工编辑修正，并剔除河流、水库和农田区域的水体，得到胡杨林区漫溢水面面积，确保每期漫溢水面提取精度满足分析要求。

2.2.2 胡杨林植被覆盖度提取 通过对几种荒漠稀疏植被覆盖度的遥感提取方法进行对比[27]，采用对荒漠区植被覆盖度提取较为适宜的修正三波段最大梯度差法[28]进行胡杨林植被覆盖度提取。该模型是对唐世浩等[29]基于地物物理光谱特征，采用近红外、红、绿3个波段梯度差与全覆盖植被的梯度差之比的三波段最大梯度差法模型的改进，改进后的模型公式如下：

$$A=\frac{d}{d_{\max}},\quad d=\frac{R_{\mathrm{nir}}-R_{\mathrm{r}}}{\lambda_{\mathrm{nir}}-\lambda_{\mathrm{r}}}-\frac{R_{\mathrm{swir}}-R_{\mathrm{nir}}}{\lambda_{\mathrm{swir}}-\lambda_{\mathrm{nir}}} \tag{1}$$

式中：A为植被覆盖度(%)；d为像元梯度差；$d_{\max}$为像元最大梯度差；R_{swir}、R_{nir}、R_{r}分别为短波红外、近红、红波段反射率；λ_{swir}、λ_{nir}、λ_{r}分别为短波红外、近红、红波段波长(nm)。为了确定$d_{\max}$，在计算的d频率累积表中，将累积频率99.5%的数值作为$d_{\max}$值

2.2.3 植被覆盖度的变化及对漫溢的响应评估方法 一元线性回归是分析变化趋势常用有效的统计分析方法，在每个像元的基础之上，计算2016—2021年胡杨林植被覆盖度的变化趋势。斜率(slope)代表研究区域每个栅格点植被覆盖度在监测时段的变化趋势。slope>0，代表该栅格内植被覆盖度呈现增加趋势，胡杨状况有所改善，且数值越大表示栅格内胡杨改善效果越明显；反之，则表示该栅格内胡杨状况变差。该方法能反映研究时段植被覆盖度变化的空间分布特征，计算公式如下：

$$\mathrm{slope}=\frac{n\times\sum_{i=1}^{n}i\times\mathrm{FVC}_i-\sum_{i=1}^{n}i\sum_{i=1}^{n}\mathrm{FVC}_i}{n\times\sum_{i=1}^{n}i^2-\left(\sum_{i=1}^{n}i\right)^2} \tag{2}$$

式中：slope为每个像元变化趋势的斜率；n为研究时序的长度，本文为6(2016—2021年共6 a)；FVC_i为第i年植被覆盖度值。

分别统计不同生态输水漫溢频次下的胡杨林植被覆盖度变化趋势，采用SPSS软件进行单因素方差分析，检验不同生态输水漫溢频次区域的胡杨林恢复程度是否有显著差异，以确定生态输水对胡杨林植被覆盖度恢复是否有重要影响。

2.2.4 GIS缓冲区分析方法 为了研究生态输水漫溢后垂直河道方向上植被覆盖度的梯度变化，这里采用ArcGIS软件中ArcToolbox的缓冲区分析(Buffer analysis)工具，沿着垂直河岸的方向，设置每2000 m间隔的多环缓冲区，缓冲区数量为以完全覆盖研究区为止。利用生成的多环等距缓冲区，分区统计不同间隔缓冲区内胡杨植被覆盖度的均值，比较和分析不同缓冲区内植被覆盖度的梯度变化特征。

3 结果与分析

3.1 生态输水漫溢面积时空分析

从2016—2021年漫溢水面的年内变化、年际变化来描述塔里木胡杨国家级自然保护区生态输水漫溢面的时序变化过程(图2)。从图2a中可以看出，漫溢水面的面积上涨时间主要在7月底至8月初，在9月达到漫溢面的最大面积，随后漫溢水面以0.6~2.2 km²·d⁻¹的速率快速下降，说明每年主要在8—9月进行生态输水。2016年与2017年的漫溢面积变化曲线相似，形成的漫溢水面峰值较大，分别为114.1 km²、147.4 km²，2018—2021年漫溢水面峰值相比较小，平均为43.5 km²。2016—2021年生态输水漫溢水面年最大合成面积变化如图2b所示。从图中可以看出，2017年生态输水漫溢面积最大，达到了246.7 km²，2020年生态输水漫溢面积最小，为70.5 km²，近4 a来漫溢水面相比于2016—2017年平均下降145.2 km²。

2016—2021年合成最大生态输水漫溢水面空间叠加后的漫溢频次如图3所示。漫溢水面在空间上呈聚集性分布，其中在保护区的西部，漫溢水面共计137.2 km²，主要集中在塔里木河南岸10 km内的范围，仅有1.2%的水面分布在南岸10 km以外的区域；而在保护区的东部，塔里木河北岸30 km范围内形成了245.8 km²的漫溢水面，是研究区漫溢水面最密集、分布最广泛的区域。对比塔里木河南北两岸的输水效果，北岸的输水漫溢面积占总漫溢水面的65%，明显大于南岸的35%；而北岸的平均漫溢频次为2.08，也大于南岸的1.72。因此，在塔里木胡杨国家级自然保护区内，塔里木河北岸的输水漫溢效果明显好于南岸。

3.2 胡杨林植被覆盖度时空变化

为了评估输水漫溢后保护区内胡杨林植被覆

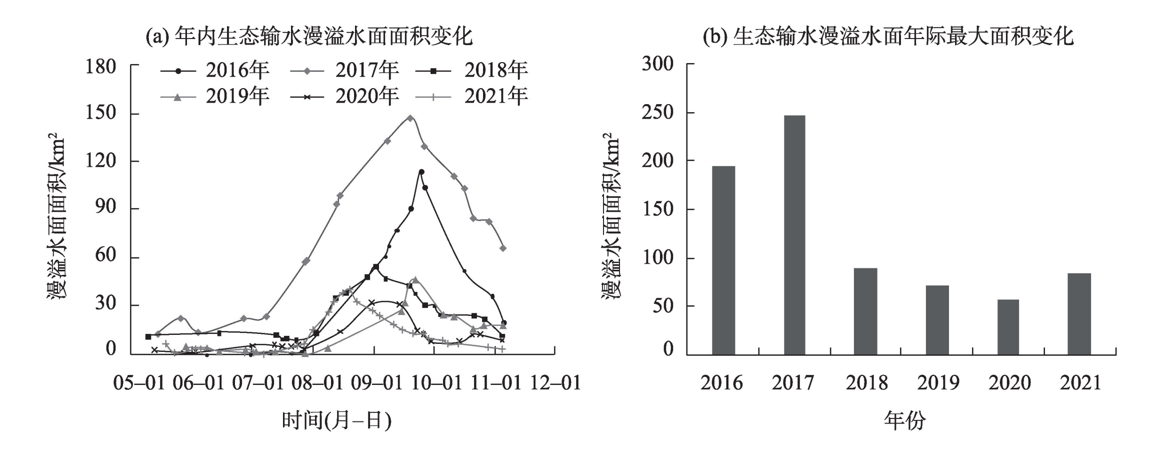


图2　生态输水漫溢面积时序变化

Fig. 2　Temporal variation of overflow area of ecological water conveyance

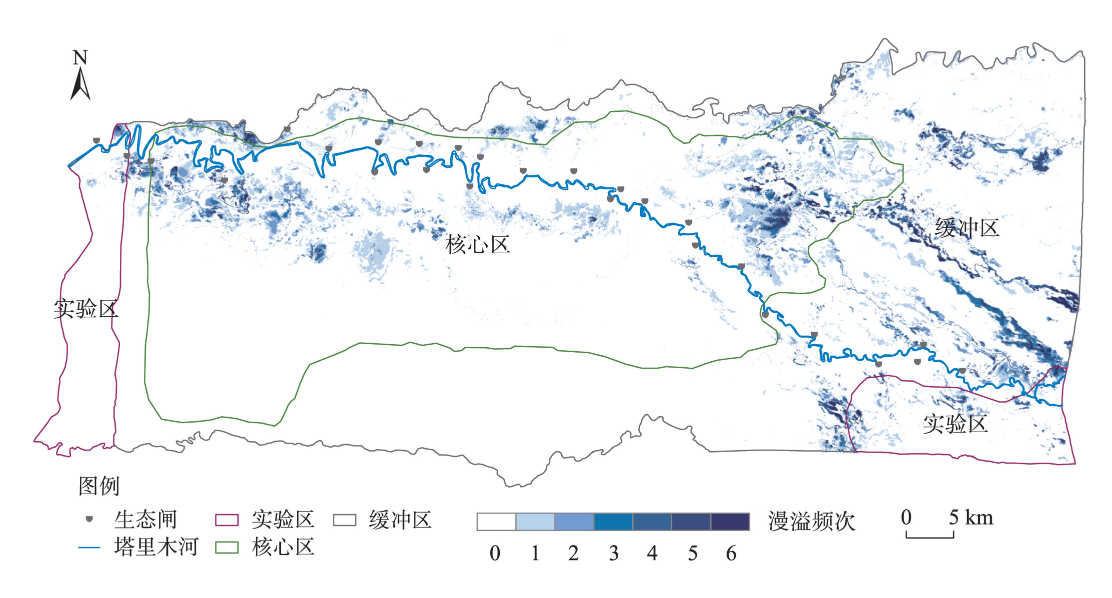


图3　2016—2021年最大漫溢水面覆盖频次分布

Fig. 3　Frequency distribution of maximum overflow surface during 2016—2021

盖度的变化，这里采用一元线性回归分析逐像元计算2016—2021年研究区植被覆盖度的变化趋势，并按照5个等级进行显著性检验，分别为显著增加(Slope>0，P<0.05)、轻微增加(Slope>0，0.05<P<0.1)、基本不变(P>0.1)、轻微退化(Slope<0，0.05<P<0.1)、显著退化(Slope<0，P<0.05)。塔里木胡杨国家级自然保护区植被覆盖度变化如图4所示，胡杨林植被覆盖度增加的区域主要分布在塔里木河北岸，东部增加最为明显，增加区域占北岸总面积的45.2%，而南岸的植被覆盖度以无显著变化或退化趋势为主。结合输水漫溢结果可知，输水漫溢面积的65%分布于塔里木河北岸，而南岸仅占35%；从空间上来看，输水漫溢区域的胡杨林植被覆盖度显著增加，而输水较少的区域处于退化或无显著变化状态。因此，生态输水对胡杨林恢复产生了积极影响。

对2016—2021年塔里木胡杨国家级自然保护区胡杨林植被覆盖度进行分区统计，结果如图5a所示。2016—2021年保护区内胡杨林平均植被覆盖度由18.88%增加至19.61%，其中塔里木河北岸的胡杨林覆盖度从18.06%增加至19.86%，其变化趋势与整体趋势一致；而塔里木河南岸的胡杨林覆盖度从20.84%降至19.34%，与总体趋势变化相反。

分析垂直河道方向不同缓冲区范围内胡杨林植被覆盖度变化(图5b)可知，2016年以来，塔里木河北岸不同缓冲区胡杨林植被覆盖度均值均处于

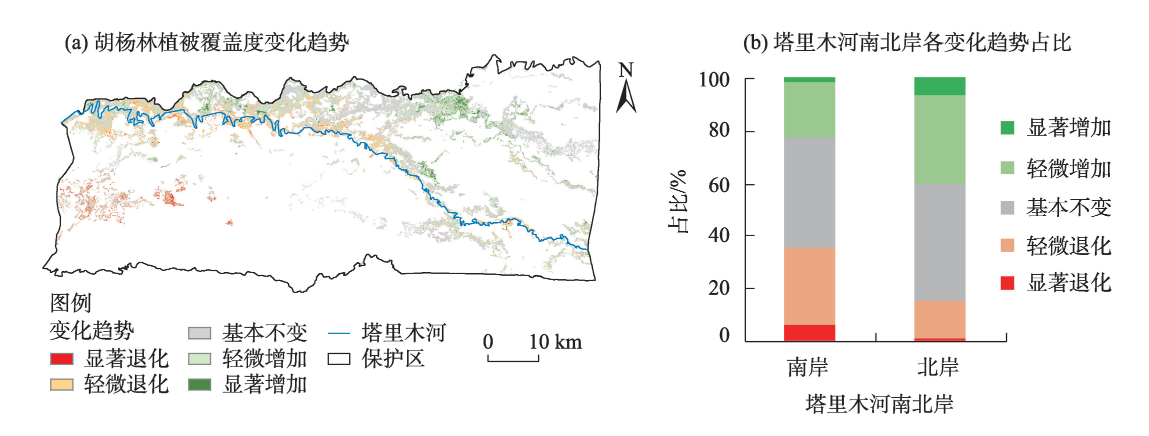


图4 2016—2021年胡杨林植被覆盖度变化趋势

Fig. 4 Change trend of vegetation coverage of *Populus euphratica* forest during 2016—2021

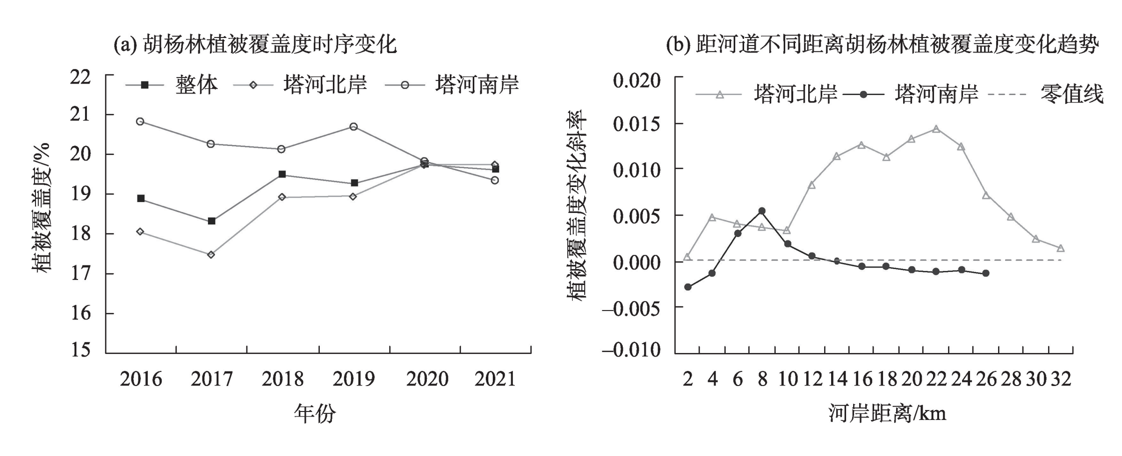


图5 不同区域胡杨林植被覆盖度变化趋势

Fig. 5 Change trend of vegetation coverage of *Populus euphratica* forest in different regions

增加趋势，其中0~10 km内植被覆盖度增加0.37%·a^{-1}，10~24 km内植被覆盖度增加1.19%·a^{-1}，而大于24 km植被覆盖度的增加趋势迅速下降，至32 km处植被覆盖度增长率仅为0.01%·a^{-1}。南岸胡杨林植被覆盖度仅在距离河岸4~14 km的缓冲区范围内呈现增加趋势，而在0~4 km和大于14 km的区域内均呈减小趋势。结合图3可知，胡杨林植被覆盖度增加的区域与输水漫溢区的空间关联度高，塔里木河北岸30 km范围内都有输水漫溢水面，而塔里木河南岸仅在10 km的范围内产生漫溢水面，缓冲区的分析结果(图5b)也表明，胡杨林植被覆盖度增加的区域也在南岸10 km范围内。

3.3 胡杨林植被覆盖度变化对漫溢频次的响应

统计不同输水漫溢频次下胡杨植被覆盖度的变化(图6)可知，在没有输水漫溢过的区域，植被覆盖度增加率平均为0.23%·a^{-1}，而超过1次输水漫溢的区域，植被覆盖度增加显著；输水漫溢频次在3次以上的植被覆盖度增加率维持在0.93%·a^{-1}~1.11%·a^{-1}。由此可见，输水漫溢对胡杨林植被覆盖度恢复

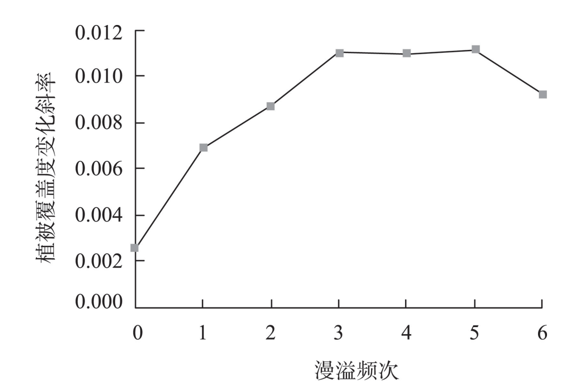


图6 不同输水漫溢频次下胡杨林植被覆盖度变化趋势

Fig. 6 Change trend of vegetation coverage of *Populus euphratica* forest under different water conveyance overflow frequency

起到了较为明显的促进作用，平均3次输水漫溢就能达到植被显著恢复的效果。

为了分析不同输水漫溢频次对胡杨林恢复的效果，利用ArcGIS软件，在不同漫溢频次下各随机选择100个胡杨林样本点，统计各样点植被覆盖度的变化率，并采用SPSS软件进行单因素方差分析。结果表明，当输水漫溢频次小于等于3次时，输水频次与胡杨林植被覆盖度增加显著正相关，而当输水频次大于3次时，输水频次的增加与植被覆盖度增加相关不显著。这也表明，2016—2021年，输水频次超过3次的林区，其恢复效果与每2 a一次输水漫溢区的植被恢复效果相近。

4 讨论

2016年开展的塔里木河胡杨林拯救行动和胡杨林灌溉工程[30]是为了恢复全流域衰败中的胡杨林。塔里木胡杨国家级自然保护区是原始胡杨林分布最为集中、保存最完整的区域[25]，也是输水漫溢的重点区域。从漫溢水面遥感动态监测、漫溢区胡杨林植被覆盖度恢复效果来看，2016—2021年输水工程的成效明显，胡杨林漫溢区的植被覆盖度增长率比未漫溢区显著提高。这与相关文献实地调查胡杨生理生态指标的研究结果一致，输水后胡杨的生长环境得以好转，输水漫溢区内的胡杨胸径、株高、密度增加[31-32]。持续的胡杨林生态输水行动对胡杨林植被恢复持续好转起到了关键作用[33]。

通过分析不同漫溢频次对胡杨林植被覆盖度的影响表明，输水漫溢区的胡杨植被覆盖度增加速率是未输水区的4~5倍，但漫溢频次也不是越多越好。2016—2021年，生态输水漫溢频次在1~3时，植被覆盖度增长速率随着漫溢频次的增加显著提高，而大于3次时植被覆盖度增加速率在0.93%·a^{-1}~1.11%·a^{-1}上下浮动，甚至还会出现增加速率下降的现象。相关研究[34]表明，塔里木河两岸土壤含盐量较高，输水漫溢次数过多会加速土壤中钠离子和氯离子在植物根部的积累，造成胡杨根系功能受损，阻碍其生长。而塔里木河多年来水量丰枯呈现交替变化，间歇性的水量丰枯对于胡杨林群落恢复更为有利[35]。张沛等[15]在研究不同漫溢频次对塔里木河下游植被物种多样性影响时也发现，漫溢频次与物种多样性存在着抛物线形关系，即中等频次的漫溢条件下植物群落的物种多样性与丰富度最高。

在胡杨林保护行动开展以来，目前为止塔里木胡杨国家级自然保护区已经开展了6 a的胡杨林生态补水保护行动，通过胡杨林受淹灌情况来看，被生态水漫溢1~6次的胡杨林面积分别为70.94 km^2、27.07 km^2、11.64 km^2、6.4 km^2、3.81 km^2、3.69 km^2，分别占胡杨林总面积的11.92%、4.56%、1.96%、1.08%、0.64%、0.62%。从漫溢输水的范围来看，目前胡杨林生态输水的覆盖面还不够广，特别是塔里木河南岸的大部分胡杨林还有退化的趋势，未来向胡杨林生态输水，可以考虑以下改进措施：

（1）增加塔里木河南岸10 km外胡杨林的生态输水量，改善保护区内部分尚处于生态退化的胡杨林。塔里木河北岸的胡杨林水分条件好，输水漫溢覆盖广，胡杨林长势良好，而南岸输水漫溢面积仅占输水漫溢总面积的35%，胡杨林恢复与北岸相比差异较大，特别远离河道的胡杨林退化区是急需扩大输水漫溢的范围。

（2）交替向不同区域胡杨林输水，提高生态输水效益。在每年生态水量不变的情况下，输水漫溢频次在0.5·a^{-1}时既能保证胡杨林恢复，又能扩大输水漫溢的范围，可以减少向同一个区域频繁输水。

5 结论

本文通过监测塔里木胡杨国家级自然保护区输水漫溢面积的变化，分析生态输水后胡杨林植被覆盖度的变化以及对漫溢频次的响应，得出以下主要结论：

（1）输水漫溢面积上涨时间主要在7月底至8月初，至9月达到最大漫溢面积。2017年生态输水漫溢面积最大，达到了246.7 km^2，2018—2021年生态输水力度相比于前2 a有所下降，其中2020年输水漫溢面积最小，仅为70.5 km^2。在空间分布上，漫溢水面呈现北多南少、下游大于上游的格局。

（2）2016—2021年塔里木胡杨国家级自然保护区内胡杨林植被覆盖度从18.88%增加至19.61%。其中，塔里木河北岸胡杨林输水漫溢面积占总漫溢面积65%，植被覆盖度呈增加趋势，而占总漫溢面积35%的南岸胡杨林大部分尚处于退化的趋势。

（3）胡杨林植被覆盖度恢复程度随着生态输水漫溢频次的增加显著提高，生态输水漫溢频次超过

3次时，胡杨林植被覆盖度平均增长速率为0.93%·a^{-1}~1.11%·a^{-1}，是未经输水胡杨林区的4~5倍。

参考文献(References)

[1] Ling H B, Zhang P, Xu H L, et al. How to regenerate and protect desert riparian *Populus euphratica* forest in arid areas[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 15418, doi: 10.1038/srep15418.

[2] Halik U, Aishan T, Betz F, et al. Effectiveness and challenges of ecological engineering for desert riparian forest restoration along China's largest inland river[J]. Ecological Engineering, 2019, 127: 11-22.

[3] 王蕾, 罗磊, 刘鹏, 等. 塔里木河中下游水分干扰对胡杨林群落物种多样性的影响[J]. 干旱区地理, 2016, 39(6): 1275-1281. [Wang Lei, Luo Lei, Liu Peng, et al. Biodiversity of *Populus euphratica* communities under water disturbance in middle and lower reaches of the Tarim River[J]. Arid Land Geography, 2016, 39(6): 1275-1281.]

[4] Li H L, Feng J Z, Bai L Y, et al. *Populus euphratica* phenology and its response to climate change in the upper Tarim River Basin, NW China[J]. Forests, 2021, 12(10): 1315, doi: 10.3390/f12101315.

[5] Xu H L, Ye M, Li J M. The ecological characteristics of the riparian vegetation affected by river overflowing disturbance in the lower Tarim River[J]. Environmental Geology, 2009, 58(8): 1749-1755.

[6] 蔚亮, 李均力, 包安明, 等. 塔里木河下游湿地面积时序变化及对生态输水的响应[J]. 植物生态学报, 2020, 44(6): 616-627. [Wei Liang, Li Junli, Bao Anming, et al. Temporal areal changes of wetlands in the lower reaches of the Tarim River and their responses to ecological water conveyance[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2020, 44(6): 616-627.]

[7] Ling H B, Guo B, Yan J J, et al. Enhancing the positive effects of ecological water conservancy engineering on desert riparian forest growth in an arid basin[J]. Ecological Indicators, 2020, 118: 106797, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106797.

[8] 邓潮洲, 张希明, 吴俊侠, 等. 输水堤坝对塔里木河中游胡杨群落及种群的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(5): 1356-1366. [Deng Chaozhou, Zhang Ximing, Wu Junxia, et al. The influence of water conveyance embankments on the *Populus euphratica*'s communities and populations in the middle reaches of Tarim River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(5): 1356-1366.]

[9] 徐梦辰, 陈永金, 刘加珍, 等. 塔里木河中游水文影响下的胡杨种群格局动态[J]. 生态学报, 2016, 36(9): 2646-2655. [Xu Mengchen, Chen Yongjin, Liu Jiazhen, et al. The distribution pattern dynamics of *Populus euphratica* are influenced by hydrology in the middle reaches of Tarim River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(9): 2646-2655.]

[10] 徐俏, 叶茂, 徐海量, 等. 塔里木河下游生态输水对植物群落组成、多样性和稳定性的影响[J]. 生态学杂志, 2018, 37(9): 2603-2610. [Xu Qiao, Ye Mao, Xu Hailiang, et al. Effects of ecological water conveyance on the composition, diversity and stability of plant community in the lower reaches of Tarim River[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(9): 2603-2610.]

[11] Yu P J, Xu H L, Ye M, et al. Effects of ecological water conveyance on the ring increments of *Populus euphratica* in the lower reaches of Tarim River[J]. Journal of Forest Research, 2012, 17(5): 413-420.

[12] 薛联青, 符芳兵, 祝薄丽, 等. 塔里木河流域下游绿洲演变对生态输水的响应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(4): 310-316. [Xue Lianqing, Fu Fangbing, Zhu Boli, et al. Response of oasis evolution to ecological water transport in the downstream of Tarim River Basin[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(4): 310-316.]

[13] 李金, 徐海量, 王勇辉, 等. 叶尔羌河下游河岸胡杨种群长势与植物多样性对淹灌的响应评估[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(7): 859-866. [Li Jin, Xu Hailiang, Wang Yonghui, et al. Evaluation on response of *Populus euphratica* population growth and plant diversity to flooding irrigation in lower reaches of Yarkant River Basin[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(7): 859-866.]

[14] 傅荩仪, 徐海量, 赵新风, 等. 漫溢干扰对塔里木河河岸退化植被的影响[J]. 中国沙漠, 2014, 34(1): 60-66. [Fu Jinyi, Xu Hailiang, Zhao Xinfeng, et al. Influences of flooding on degraded riparian vegetation along the lower Tarim River[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(1): 60-66.]

[15] 张沛, 徐海量, 凌红波, 等. 塔里木河下游不同漫溢频次下植物群落变化初探[J]. 干旱区研究, 2016, 33(6): 1242-1248. [Zhang Pei, Xu Hailiang, Ling Hongbo, et al. Variation of vegetation communities under different flooding frequency in the lower reaches of the Tarim River[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(6): 1242-1248.]

[16] 李玉朋, 陈亚宁, 叶朝霞, 等. 塔里木河下游输水20 a的生态响应[J]. 干旱区地理, 2021, 44(3): 700-707. [Li Yupeng, Chen Yaning, Ye Zhaoxia, et al. Ecological responses of ecological water conveyance in the lower reaches of Tarim River for 20 years[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(3): 700-707.]

[17] 徐海量, 宋郁东, 王强. 胡杨生理指标对塔里木河下游生态输水的响应[J]. 环境科学研究, 2003, 16(4): 24-27. [Xu Hailiang, Song Yudong, Wang Qiang. Response of physiological indexes of *Populus enphratica* to ecological water transport in the lower reaches of Tarim River[J]. Research of Environmental Sciences, 2003, 16(4): 24-27.]

[18] 安红燕, 叶茂, 徐海量, 等. 塔里木河下游胡杨径向生长量对生态输水的响应[J]. 中国沙漠, 2011, 31(4): 957-962. [An Hongyan, Ye Mao, Xu Hailiang, et al. Response of radial increment of *Populus euphratica* to ecological water conveyance in lower reaches of the Tarim River[J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(4): 957-962.]

[19] 李均力, 肖昊, 沈占锋, 等. 2013—2018年塔里木河下游植被动态变化及其对生态输水的响应[J]. 干旱区研究, 2020, 37(4): 985-992. [Li Junli, Xiao Hao, Sheng Zhanfeng, et al. Vegetation changes during the 2013—2018 period and its response to ecological water transport in the lower reaches of the Tarim River[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(4): 985-992.]

[20] Chen Y N, Chen Y P, Zhu C G, et al. Ecohydrological effects of water conveyance in a disconnected river in an arid inland river basin [J]. Scientific Reports, 2022, 12: 9982, doi: 10.1038/s41598-022-14524-z.

[21] 高生峰, 叶茂. 塔里木河上、中游极端干旱区淹灌对胡杨(*Populus euphratica*)长势的影响[J]. 生态科学, 2020, 39(2): 50-57. [Gao Shengfeng, Ye Mao. Effect of flood on growth of *Populus euphratica* in extreme arid region in the upper and middle reaches of Tarim River for example[J]. Ecological Science, 2020, 39(2): 50-57.]

[22] 李金, 徐海量, 王勇辉, 等. 塔里木河上中游荒漠河岸林植物群落对淹灌的响应[J]. 水土保持通报, 2019, 39(3): 31-38. [Li Jin, Xu Hailiang, Wang Yonghui, et al. Respones of riparian forest plant communities to flood irrigation in upper and middle reaches of Tarim River[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(3): 31-38.]

[23] 张勇, 吴子璇, 石锐, 等. 基于多源遥感的和田河流域生态补水对流域植被变化影响研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2022, 58(1): 125-134. [Zhang Yong, Wu Zixuan, Shi Rui, et al. Impact of ecological water supplementation on vegetation changes in the Hotan River Basin as judged by multi-source remote sensing data[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science Edition) , 2022, 58(1): 125-134.]

[24] Li H, Shi Q D, Wan Y B, et al. Using Sentinel-2 Images to map the *Populus euphratica* distribution based on the spectral difference acquired at the key phenological stage[J]. Forests, 2021, 12 (2): 147, doi: 10.3390/f12020147.

[25] 赵俊红, 周华荣, 卢雅焱, 等. 2000—2015年塔里木胡杨林国家级自然保护区NPP时空动态特征及其影响因素[J]. 干旱区地理, 2020, 43(1): 190-200. [Zhao Junhong, Zhou Huarong, Lu Yayan, et al. Temporal-spatial characteristics and influencing factors of the vegetation net primary production in the national nature reserve of *Populus euphratica* in Tarim from 2000 to 2015[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(1): 190-200.]

[26] McFeeters S K. The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features[J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(7): 1425-1432.

[27] 李向婷, 白洁, 李光录, 等. 新疆荒漠稀疏植被覆盖度信息遥感提取方法比较[J]. 干旱区地理, 2013, 36(3): 502-511. [Li Xiangting, Bai Jie, Li Guanglu, et al. Comparison of methods based on MODIS for estimating sparse vegetation fraction across desert in Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2013, 36(3): 502-511.]

[28] Jiapaer G, Chen X, Bao A M. A comparison of methods for estimating fractional vegetation cover in arid regions[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(12): 1698-1710.

[29] 唐世浩, 朱启疆, 周宇宇, 等. 一种简单的估算植被覆盖度和恢复背景信息的方法[J]. 中国图象图形学报, 2003, 8(11): 1304-1308. [Tang Shihao, Zhu Qijiang, Zhou Yuyu, et al. A simple method to estimate crown cover fraction and rebuild the background information[J]. Journal of Image and Graphics, 2003, 8 (11): 1304-1308.]

[30] 李建军. 塔里木河流域胡杨林拯救行动及其重要意义[J]. 绿色科技, 2019, 16: 91-92. [Li Jianjun. Rescue action of *Populus euphratica* forest in Tarim River Basin and its significance[J]. Journal of Green Science and Technology, 2019, 16: 91-92.]

[31] 高生峰, 叶茂, 赵新风, 等. 极端干旱区淹灌对胡杨(*Populus euphratica*)长势的影响——以叶尔羌河中、下游为例[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(增刊2): 29-35. [Gao Shengfeng, Ye Mao, Zhao Xinfeng, et al. Analysis on the growth trend of *Populus euphratica* on Yarkant River after flood irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(Suppl. 2): 29-35.]

[32] 白元, 徐海量, 赵新风, 等. 河水漫溢对胡杨(*Populus euphratica*)分布格局的影响[J]. 中国沙漠, 2013, 33(5): 1356-1362. [Bai Yuan, Xu Hailiang, Zhao Xinfeng, et al. Influence of river flooding on the distribution pattern of *Populus euphratica* in the lower reaches of the Tarim River[J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(5): 1356-1362.]

[33] Jiao A Y, Wang W Q, Ling H B, et al. Effect evaluation of ecological water conveyance in Tarim River Basin, China[J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 1019695, doi: 0.3389/fenvs.2022.1019695.

[34] Ling H B, Zhang P, Guo B et al. Negative feedback adjustment challenges reconstruction study from tree rings: A study case of response of *Populus euphratica* to river discontinuous flow and ecological water conveyance[J]. Science of the Total Environment, 2017, 574: 109-119.

[35] 孙健. 关于塔里木河流域胡杨林生态补水的思考与建议[J]. 四川水利, 2021, 42(1): 92-94. [Sun Jian. Thoughts and suggestions on ecological water replenishment of *Populus euphratica* forest in Tarim River Basin[J]. Sichuan Water Resources, 2021, 42(1): 92-94.]

Influences of ecological water conveyance on *Populus euphratica* forest restoration in the middle reaches of Tarim River

WANG Zhen[1,2], LI Junli[1,3], ZHANG Jiudan[1,2], WU Haoru[1,2], GUO Xuefei[4]

(1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of GIS & RS Application of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 4. College of Life Sciences, Tarim University, Aral 843300, Xinjiang, China)

Abstract: Ecological water conveyance is an important measure in the special action of *Populus euphratica* forest protection, and the analysis of the effect of submerged irrigation on the restoration of *P. euphratica* forest is critical for evaluating the effect of ecological restoration. We select the National Nature Reserve of *P. euphratica* in Tarim Basin, Xinjiang, China, as the study area. Based on dense time-series remote sensing data, NDWI threshold segmentation and human-computer interaction were used to extract the overflowing surface of ecological water conveyance, and the modified maximal gradient difference model was used to retrieve the vegetation coverage of the *P. euphratica* forest. Geographical information system spatial analysis and regression analysis were used to dynamically monitor the ecological water conveyance since the implementation of the special action for *P. euphratica* forest protection in 2016 and quantitatively analyze the impact of the submerged irrigation area and frequency on the restoration of the *P. euphratica* forest vegetation coverage. The results are as follows: (1) The submerged irrigation area is mainly rising from the end of July to the beginning of August, reaching the maximum overflow area in September. In 2017, the area of ecological water conveyance was the largest, reaching 246.7 km^2, and the ecological water conveyance force in 2018—2021 was reduced compared with the previous two years. The smallest area in 2020 was 70.5 km^2. There is a tendency for the spatial distribution to be more in the north and less in the south and for downstream to be greater than upstream. (2) The vegetation coverage of the National Nature Reserve of *P. euphratica* in Tarim, increased from 18.88% to 19.61% from 2016 to 2021. The north side of the Tarim River with a greater submerged irrigation area shows an increasing trend, whereas the *P. euphratica* forest on the south side of the Tarim River with less ecological water conveyance still exhibits a degradation trend. (3) The restoration degree of vegetation coverage of the *P. euphratica* forest increased significantly with an increase in the ecological water submerged irrigation frequency. When the submerged irrigation frequency exceeded three times, the growth rate of vegetation coverage of the *P. euphratica* forest was approximately $0.93\%\cdot a^{-1}-1.11\%\cdot a^{-1}$, which was 4−5 times higher than that of the nonecological water conveyance overflow area. This study provides a new idea for the evaluation of ecological water conveyance benefits of the *P. euphratica* forest and is of great significance for evaluating the effectiveness of the special action of *P. euphratica* forest protection and developing a more rational water transport strategy.

Key words: National Nature Reserve of *Populus euphratica* in Tarim; ecological water conveyance; vegetation coverage; ecological assessment